

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018030501

中国东部近海现代沉积环境

段晓勇^{1,2}, 印萍^{1,2}, 刘金庆^{1,2}, 曹珂^{1,2}, 高飞^{1,2}, 陈小英^{1,2}

1. 自然资源部海洋环境地质重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071

摘要: 东海近岸海域岛屿、入海河流众多, 大量陆源物质随沿岸流自长江口向东迁移, 是海陆相互作用最为强烈的区域之一。对 2016 和 2017 年夏季采集的 570 个东海近岸表层沉积物样品进行了沉积物物理化学性质、粒度特征、有机质含量等测试分析。结果表明, 这些特征参数明显受区域沉积环境的控制。杭州湾区域沉积物偏弱碱性, 氧化还原电位(Eh) < 0, 有机质含量北部偏高, 沉积物组成以黏土质粉砂为主, 抗剪强度较低(普遍 < 0.5 kPa), 各指标无明显分布规律, 相关性较强。浙江东部沿海区域沉积物近中性至弱酸性, Eh 较高(> 0), Eh 与 pH 自陆向海降低, 象山港、乐清湾海域有机质含量较高; 舟山至台州海域以粉砂为主, 台州以南分布斑块状泥质区, 抗剪强度比杭州湾区域偏高, 各指标无明显相关性。整体来看, 杭州湾与浙江东部沿海属于两个完全不同的沉积环境体系, 主要是因杭州湾物质来源较为稳定, 区域水动力较强, 导致沉积物分布相对均一; 而浙江东部海域河流、岛屿较多, 各个区域物质来源和水动力环境都存在较大差异。

关键词: 表层沉积物; 沉积环境; 粒度特征; 物理化学性质; 东海

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

Modern sedimentation environments in the coastal zone of East China

DUAN Xiaoyong^{1,2}, YIN Ping^{1,2}, LIU Jinjing^{1,2}, CAO Ke^{1,2}, GAO Fei^{1,2}, CHEN Xiaoying^{1,2}

1. Key Laboratory of Marine Environmental Geology, Ministry of Natural Resources, Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

Abstract: Abundant islands and rivers occur in the waters off Zhejiang coast of East China. Huge amount of terrestrial materials carried by the Yangtze River moves to the east by coastal current. It is an area with the most intense land-sea interaction. In the summers of 2016 and 2017, 570 surface sediment samples were collected from the East China Sea, and physical and chemical properties, grain size distributions and organic matter contents of sediments were tested. Results show that sediments in Hangzhou Bay are dominated by clayey silt with high pH (> 7), low Eh (< 0) and low shear strength (< 0.5 kPa). The content of organic matters is higher in the north rather than in other regions. Generally, no obvious distribution pattern is observed for those parameters, but they are significant correlated. In the east coast of Zhejiang, for example, the sediments are dominated by silt in the north (Zhoushan-Taizhou), but by mud in the south (Taizhou-Wenzhou). Both pH and Eh are decreasing seaward. Higher content of organic matters have been found in the Xiang-shan Port and Yue-qing Bay. However, there is no significant correlation between different parameters. Therefore, the sedimentary environment of Hangzhou Bay and the eastern Zhejiang coastal area is obviously different. In Hangzhou Bay, the sediment distribution is more regular due to the rather stable sources and strong hydrodynamic environment. However, the sediment sources and hydrodynamic environment vary significantly due to widely distributed islands and rivers to the east coast of Zhejiang.

Key words: surface sediment; sedimentary environment; granular characteristic; physicochemical properties; East China Sea

浙江是我国东部经济最为发达的地区之一, 也是我国海岸带地形最为复杂、海陆相互作用最为强烈的区域^[1,2]。受长江、钱塘江、甬江、椒江等河流

入海的影响, 大量的陆源物质在浙江沿海沉积。受近几十年经济快速发展的影响, 海岸带开发日益强烈, 入海污染物质日益增多^[3], 人类活动对海洋环境

资助项目: 国家地质调查项目“长江口等重点海岸带综合地质调查”(DD20160145); 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府海洋科学研究中心联合资助项目“海岸带与陆海相互作用过程”(U1606401)

作者简介: 段晓勇(1987—), 男, 博士, 研究方向为环境地球化学, E-mail: duan-xy@qq.com

通讯作者: 印萍(1973—), 女, 研究员, E-mail: pingyin@fio.org.cn

收稿日期: 2018-03-05; **改回日期:** 2018-04-24. 文凤英编辑

的影响、沿海地质条件对经济发展的制约作用日益明显,海岸带环境污染与地质灾害问题越来越受到关注^[4]。

近几十年来,世界各国均投入大量资金对海岸带地区沉积环境进行了大量调查^[5]。对海岸带地区环境保护、基础科学研究等提供了大量的数据,如我国海洋局自 2000 年开始每年不定期发布的《海洋环境质量公报》^[6],为海洋环境保护提供了科学依据,也为基础研究领域和社会公众提供了一个全面了解海洋环境状况的窗口。根据目前的研究结果,东海内陆架区域沉积环境季节性差异明显,夏季河流淡水输入量较大,尤其是长江冲淡水对东部沿海区域影响最大^[7]。长江输入海物质存在明显的“夏储东输”特性,以沉积在浙江近岸为主^[8],但近年来部分研究发现长江输入海物质存在明显向东跨陆架搬运^[9]。整体来看,该区域沉积环境以自然因素控制占主导,但是近年来受人为活动的影响愈加明显^[10],如因流域大量建坝使入海泥沙减少导致长江水下三角洲出现明显侵蚀^[11],沿江沿海工农业生产大量排放 N 和 P 等导致海域赤潮频发^[12],河口与近岸海域被严重污染等^[13]。

本项研究依托地质调查项目,采集了浙江海岸带海域大量表层沉积物,并对物理化学性质、有机质含量及来源、粒度特征、抗剪强度等进行了测试和研究,试图系统揭示浙江海岸带海域表层沉积环境现状,并评估其与自然环境、人类活动的相关性。

1 研究区域

研究区自杭州湾北部(靠近上海金山区域)延伸至温州南部海域,覆盖整个浙江海岸带。2016 和 2017 年度夏季在浙江沿岸海域用箱式采样器共采集表层沉积物样品 570 个。采样站位如图 1 所示。

2 方法

酸碱度(pH)、氧化还原电位(Eh)和抗剪强度在样品采集上船后现场测定,样品采集与现场测试严格按照“海岸带环境地质调查规范(1:100000)”相关要求执行^[14]。

沉积物粒度、有机质含量测试在自然资源部海洋地质实验检测中心进行,检测过程、数据质量控制严格按照计量认证相关要求执行。沉积物粒度测试:沉积物样品经过洗盐、用 10% 的 H_2O_2 去除有机质、0.1mol/L 的盐酸去除碳酸盐后,使用超声波

发生器将样品充分分散后,采用马尔文 Mastersizer 3000 激光粒度仪进行测试^[15]。总有机碳(TOC)和总氮(TN)的测试:样品经冷冻干燥后研磨过 80 目筛,取少量研磨后的沉积物加入盐酸浸泡 24h,离心后弃去上清液,用去离子水将酸洗后的沉积物洗至中性,然后冷冻干燥,准确称取一定量沉积物上机测试,详细操作见文献^[16,17]。

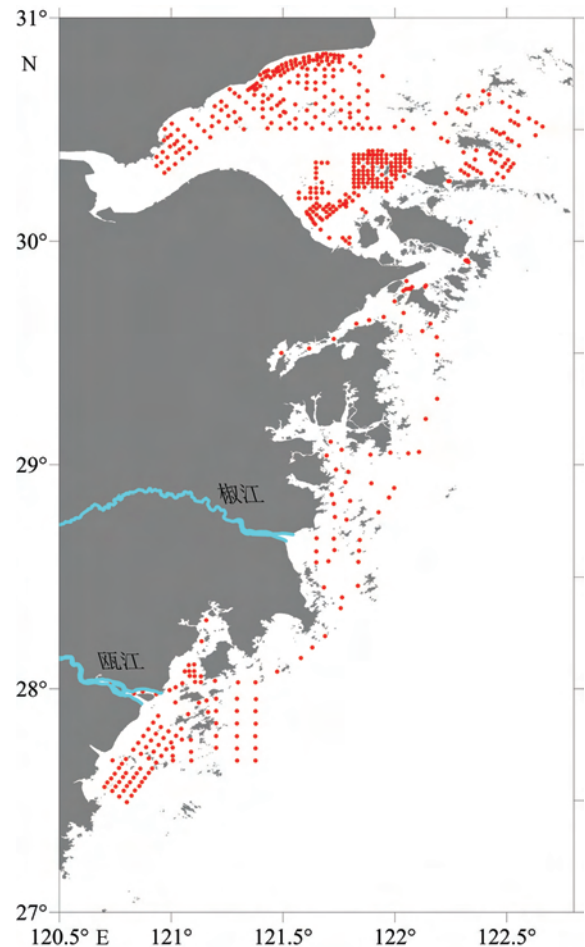


图 1 东海沿岸表层沉积物采集站位

Fig.1 Map of surface sediments sampling sites in the coast region of East China Sea

3 结果与讨论

3.1 沉积物环境物理化学性质

表层沉积物 pH 与 Eh 值分布特征如图 2 所示。整体来看杭州湾与浙江东部沿海区域差异明显,该区域中 pH 均值 7.41, Eh 均值 -18.79mV。pH 整体近中性,杭州湾和离岸较近区域均呈弱碱性,离岸较远区域偏酸性,浙江东部沿海 pH 呈自陆向海降低趋势,由弱碱性变为弱酸性;Eh 在杭州湾区域较

低,浙江东部沿海呈自陆向海降低趋势。这表明表层沉积物的 pH、Eh 与陆源物质的输入有直接关系。舟山至温州沿岸表层沉积物 pH 与 Eh 整体无显著相关性($R^2=0.13$),但在杭州湾区域 pH 与 Eh 显著负相关($R>0.85$),因此,杭州湾与浙江东部沿岸区域存在明显的差异,属于两个完全不同的沉积环境体系。

杭州湾区域 pH 均值 7.53, Eh 均值 -26.51 mV;象山至温州北部沿岸 pH 均值 7.13, Eh 均值 -1.78 mV;温州周边海域 pH 均值 7.25, Eh 均值 -7.03 mV。整体来看,杭州湾区域 pH 高于浙江东部沿海,而 Eh 低于浙江东部沿海。杭州湾区域整体属于 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HS}^-/\text{S}/\text{HS}^-$ 体系控制的还原环境,而浙江东部沿海属于有机质、铁锰体系控制的还原环境^[18]。杭州湾区域较低的 Eh 值与该区域的水动力环境有直接关系,来源于长江、钱塘江等河流的高营养水体进入杭州湾以后,导致该区域富营养化,虽然水体中接收了大量的陆源有机质、并且有机质含量较高,但是在强潮流的作用下最终只有少部分陆源有机质被埋藏在杭州湾地区的沉积物中。特别是在近年来,长江输沙量显著减少^[19],导致长江口及其邻近海域底部沉积物的动力分选作用和区域内沉积物的再分配作用持续增强,导致区域内分布更加均匀,该区域中有机质分布及来源相较于 10 年前已变

得更加均匀^[20]。这也是该区域中 pH、Eh 分布较为均匀无明显变化趋势,并且相关性极高的主要原因。

3.2 沉积物有机质含量及来源

TOC、TN 及 TOC/TN 比值分布如图 3 所示。TOC 与 TN 在钱塘江口、宁波甬江口、台州椒江口临近海域含量最低;在杭州湾北部、象山港和瓯江口周边海域含量较高。浙江入海河流中,甬江、鳌江、椒江、钱塘江水质相对较差,瓯江水质相对较好。根据《中国近岸海域环境质量公报(2016)》,温州、台州水质位列“差”级,而宁波、嘉兴、舟山海域水质则为“极差”级别。这就表明河流、港口是该区域中有机质的重要输入源,然而受不同沉积环境控制,强水动力环境区域有机质含量较高的细颗粒物难以沉积,如钱塘江口、甬江口等。因而导致水质“极差”,而沉积物中污染物质含量可能并不高。

在杭州湾区域,除北侧靠近长江口区域 TOC、TN 含量较高外,整体分布较均匀,无明显的变化趋势,主要是受杭州湾区域强潮流影响,区域内混合较为均匀。TOC/TN 比值指示杭州湾中部区域有机质主要来源于海洋,这与该区域中富营养化有关(TN 偏高)。值得注意的是在杭州湾东西两端 TOC/TN 值具有两个明显的高值区,是因为悬浮颗粒物离开河口进入开阔海域以后快速沉积所致。浙

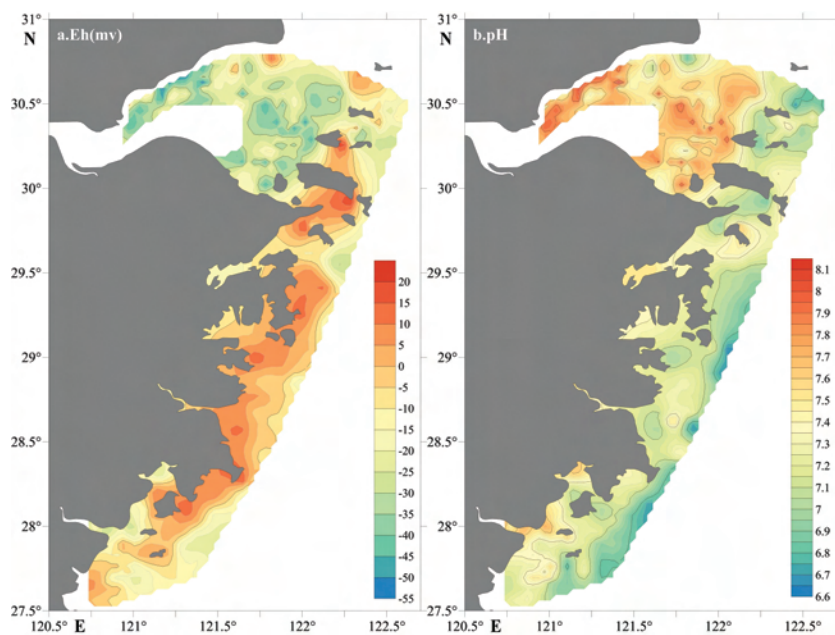


图2 表层沉积物 Eh 和 pH 分布图

Fig.2 Distribution of pH and Eh of surface sediments

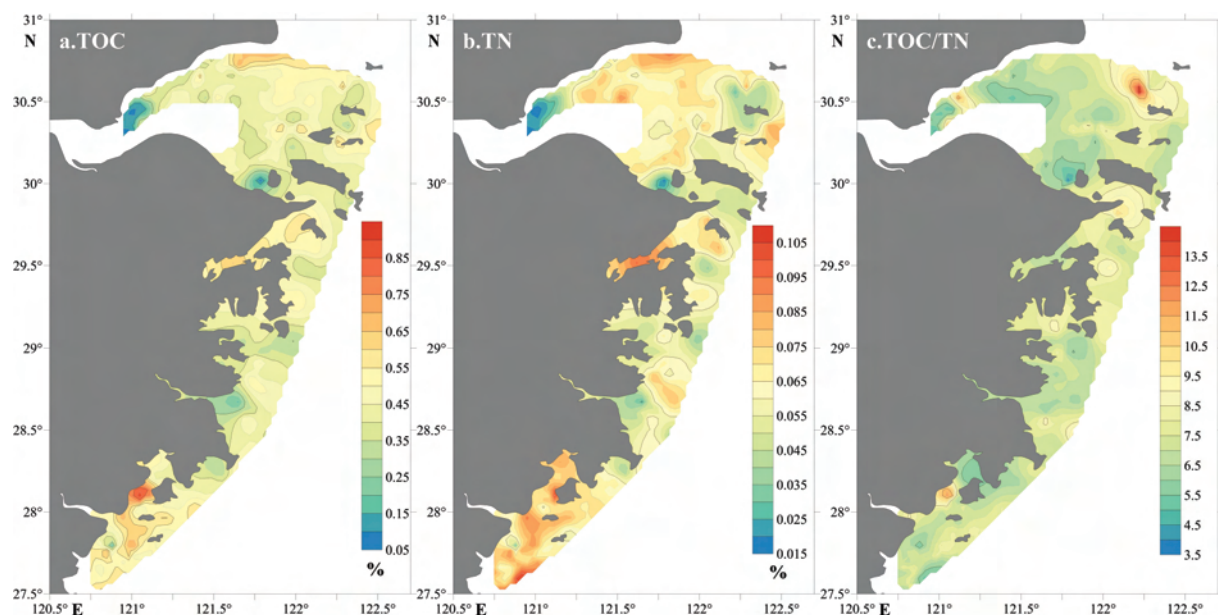


图 3 表层沉积物中总氮(TN)、总有机碳(TOC)和 TOC/TN 分布
Fig.3 Distribution of TN, TOC and TOC/TN of surface sediments

江东部沿海区域 TOC/TN 比值无明显的变化趋势,点源特征明显,如乐清湾、三门湾、象山港区域海源有机质贡献较高。

TOC 与 TN 显著正相关($R^2=0.745$),杭州湾区域的相关性($R^2=0.6914$)低于浙江东部沿海区域($R^2=0.7804$)。这就表明浙江东部沿岸 TOC、TN 来源更加接近,而在杭州湾区域因过度富营养化,导致藻类繁殖,最终降低了沉积物中陆源有机质的相对贡献;浙江东部沿岸区域陆源有机质的贡献相对较高,这与根据生物标志物、稳定同位素等揭示的结果一致^[21]。

整体来看,杭州湾区域沉积物中有机质主要来源于海水富营养化所产生的大量浮游生物;杭州湾口(舟山北部海域)沉积物中有机质主要来源于长江;浙江东部沿海除局部海湾以外,沉积物中有机质整体以海陆混合为主,该区域中陆源物质贡献高于杭州湾区域。

3.3 沉积物粒度组成特征

研究区表层沉积物在 Folk 分类图上的分布如图 4 所示,整体以粉砂为主,其次是砂质粉砂和泥。整体来看,东部沿海大部分沉积物样品更接近于泥,而杭州湾区域更接近粉砂和砂质粉砂。

表层沉积物组成分布同样存在明显的区域差异,不同粒级含量的沉积物组成分布如图 5 所示。除钱塘江口、甬江口、岱山东部、瓯江口区域外,其他区域沉积物中的含砂量均低于 5%。整体上杭州湾

区域沉积物中粉砂含量较高(>65%),黏土含量低于 30%;而在浙江东部沿海区域黏土含量较高,这是因水动力条件的区域差异所导致。杭州湾区域强流、强潮,表面交换程度较高,导致黏土粒级组分难以沉积^[22,23]。

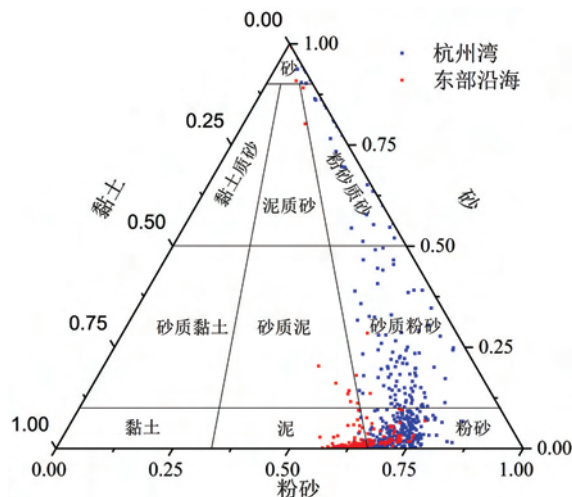


图 4 表层沉积物在 Folk 分类图中的分布
Fig.4 The distribution of surface sediment samples in Folk's triangle

沉积物类型分布如图 6 所示。其分布与沉积动力强弱密切相关。整体可以划分为 3 个区域:

(1)杭州湾区域:除钱塘江口区域为粉砂质砂和砂质粉砂以外,整个杭州湾中部区域沉积物均为黏

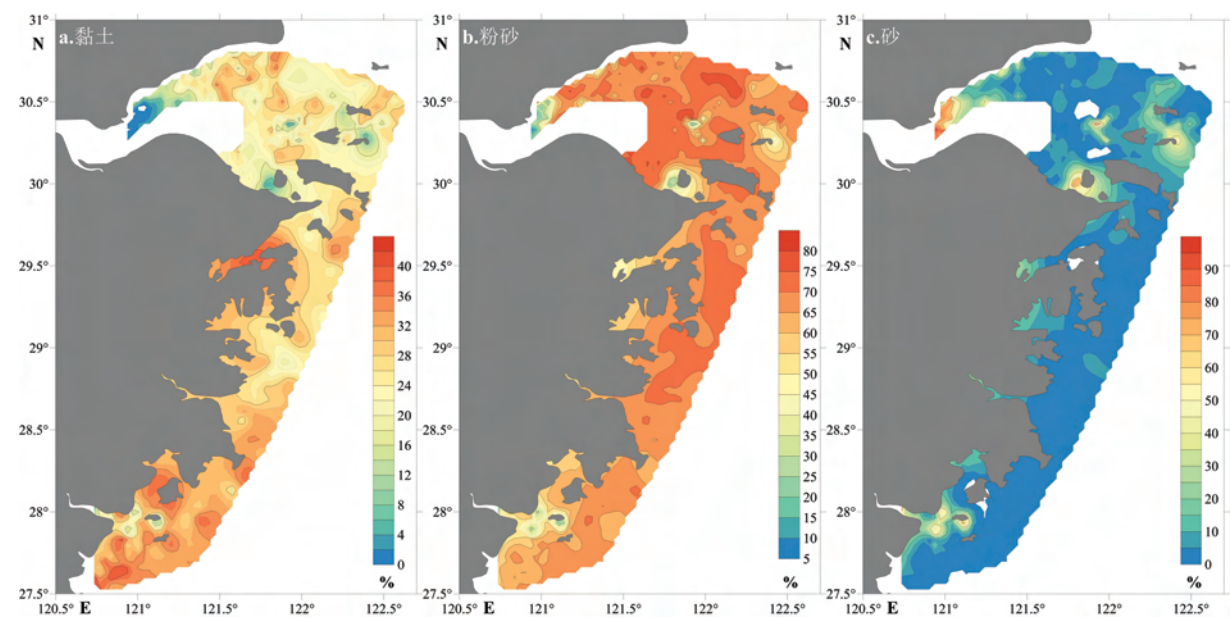


图 5 表层沉积物中砂、粉砂和黏土含量分布

Fig.5 Distributions of the contents of clay, sand and silt of surface sediments

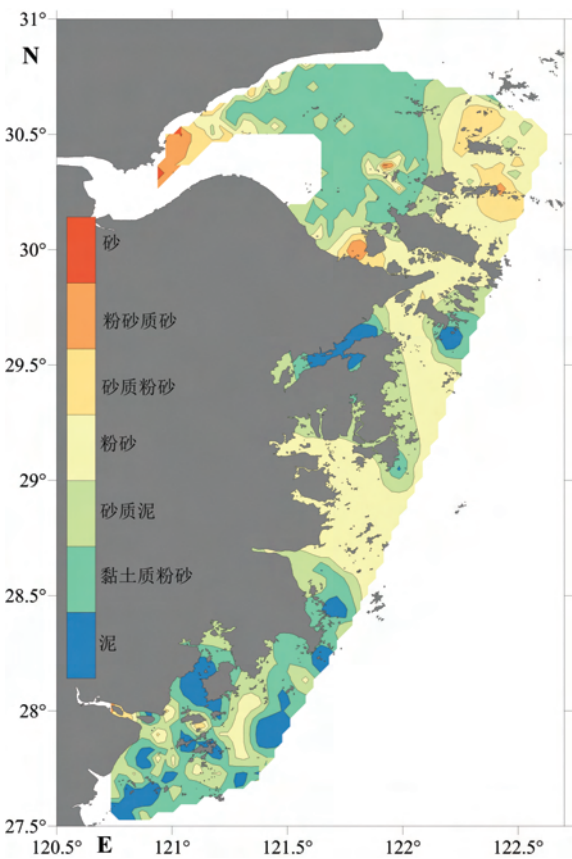


图 6 表层沉积物类型分布图

Fig.6 Distribution of surface sediment types

土质粉砂;(2)舟山至台州区域:该区域中除象山港和六横岛南部区域沉积物为泥以外,其他大部分区域均为粉砂;(3)台州至温州区域:该区域沉积物以斑块状泥质沉积为主。

3.4 沉积物抗剪强度

表层沉积物抗剪强度分布如图 7 所示。整体来

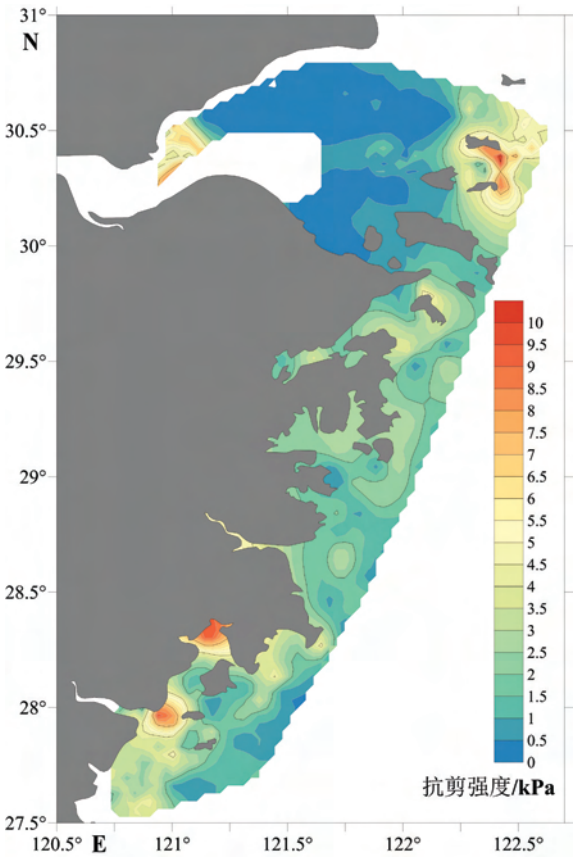


图 7 表层沉积物抗剪强度分布

Fig.7 Distribution of surface sediment shear strength

看,抗剪强度分布也存在明显的区域性差异,其与表层沉积物组成特征等密切相关。杭州湾东部(钱塘江口)和舟山群岛北部海域表层沉积物抗剪强度较高,其平均值分别为 4.79 和 4.41kPa;杭州湾中部区域抗剪强度较低,平均值为 0.38kPa。舟山南部至温州北部区域抗剪强度分布较为均一,岛屿周边、近岸区域略高,平均值为 2.07kPa。温州沿岸区域呈现明显的自陆向海降低趋势,平均值为 2.67kPa。

沉积物抗剪强度受到沉积物组成、水动力条件、颗粒形态等因素影响。颗粒形态不规则、会使得颗粒之间咬合力增强,从而增加沉积物抗剪强度^[23]。杭州湾中部区域沉积物分布较为均匀,以黏土质粉砂为主,抗剪强度较低;而在浙江东部沿海沉积物类型分布不连续,粉砂、泥等呈斑块状分布。

3.5 沉积物各参数相关性分析

研究区表层沉积物性质相关性统计结果如表 1 所示。杭州湾区域与浙江东部海域各参数相关性具有明显差异,杭州湾区域表层沉积物 pH 与 Eh、TOC 与 TN、TOC 及 TN 与平均粒径及分选系数具有较高相关性;pH、抗剪强度与其他指标负相关。而在浙江东部沿海区域仅 TOC 与 TN 呈显著正相关,大部分指标之间无相关性($p>0.05$)。

这进一步证明杭州湾与浙江东部沿海是两个完全不同的沉积环境,杭州湾区域受区域环流的影响,物质分布更加均匀,各指标更容易相互影响;而浙江东部沿海河流、岛屿众多,区域差异更加明显,导致各个区域的控制因素存在明显差异。

表 1 杭州湾(左下部分)和浙江东部沿海区域(右上部分)表层沉积物性质相关性统计
Table 1 The relationships between different characteristics of the surface sediments
Samples from Hangzhou Bay and the east coast of Zhejiang Province are showed in the
lower left and upper right part, respectively

	pH	Eh	抗剪强度	TN	TOC	TOC/TN	平均粒径	分选系数
pH	—	−0.309	0.473	−0.031 *	0.092 *	0.151 *	−0.243	0.029 *
Eh	−0.834	—	−0.139 *	−0.044 *	−0.103 *	−0.064 *	0.138 *	−0.011 *
抗剪强度	−0.297	0.173	—	−0.011 *	−0.041 *	0.039 *	−0.029 *	0.187
TN	−0.247	0.196	−0.435	—	0.788	−0.277	0.472	0.021
TOC	−0.324	0.296	−0.324	0.886	—	0.350	0.346	0.245
TOC/TN	−0.143 *	0.162 *	0.026 *	−0.102 *	0.361	—	−0.076 *	0.398
平均粒径	−0.274	0.228	−0.336	0.761	0.735	0.126 *	—	0.146
分选系数	−0.314	0.251	−0.300	0.620	0.647	0.212	0.647	—

注: * 代表 $p>0.05$

4 结论

- (1) 杭州湾区域与浙江东部海域的沉积环境具有明显差异,是两个完全不同的沉积区域;
- (2) 杭州湾中部沉积物以黏土质粉砂为主,抗剪强度较低,杭州湾区域 pH 均值 7.53, Eh 均值 −26.51mV, pH 与 Eh 显著负相关; TOC 与 TN 分布较为均匀,以海源贡献为主;
- (3) 杭州湾西部(钱塘江口)、舟山群岛北部以粉砂和砂质粉砂为主,抗剪强度较高, TN 与 TOC 含量远低于杭州湾中部,主要是因强潮流影响;
- (4) 浙江东部海域 pH 自陆向海降低,由偏碱性变为偏酸性, Eh 自陆向海降低; TN、TOC 含量呈现明显的点源特征,在象山港、甬江口等区域具有最高值;台州北部以粉砂为主,南部以泥为主。

参考文献 (References)

[1] 石学法, 刘升发, 乔淑卿, 等. 东海闽浙沿岸泥质区沉积特征与古环境记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(4): 19-30. [SHI Xuefa, LIU Shengfa, QIAO Shuqing, et al. Depositional features and palaeoenvironmental records of the mud deposits in Min-Zhe coastal mud area, East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(4): 19-30.]

[2] 黄龙, 张志珣, 耿威, 等. 闽浙沿岸东部海域表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(6): 161-169. [HUANG Long, ZHANG Zhixun, GENG Wei, et al. Grain size of surface sediments in the eastern min-zhe coast: an indicator of sedimentary environments[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(6): 161-169.]

[3] 段晓勇, 印萍, 刘金庆, 等. 滦河口表层沉积物中重金属和多环芳烃的分布、来源及风险评估[J]. 中国环境科学, 2016, 36(4): 1198-1206. [DUAN Xiaoyong, YIN Ping, LIU Jinqing,

- et al. Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of Luan River estuary: distributions, sources and ecological risk assessments[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(4):1198-1206.]
- [4] 刘珊珊, 张勇, 龚淑云, 等. 长江三角洲经济区海域沉积物重金属分布特征及环境质量评价[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(5):63-71.[LIU Shanshan, ZHANG Yong, GONG Shuyun, et al. Distribution pattern of heavy metals in the surface sediments and environment quality evaluation for the Yangtze river deltaic economic zone[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(5):63-71.]
- [5] 周庆海. 为助推我国海洋事业健康发展提供科学依据——908专项阶段性工作总结[J]. *海洋开发与管理*, 2010, 27(6):3-5. [ZHOU Qinghai. To provide scientific basis for the healthy development of Marine industry in China-A summary of 908 special periodical work [J]. *Ocean Development and Management*, 2010, 27(6):3-5]
- [6] 国家海洋局, 中国海洋环境质量公报[R], 2002-2016. <http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/>.
- [7] Qiao S, Shi X, Wang G, et al. Sediment accumulation and budget in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Marine Geology*, 2017, 390:270-281.
- [8] Xu K, Milliman J D. Seasonal variations of sediment discharge from the Yangtze River before and after impoundment of the Three Gorges Dam[J]. *Geomorphology*, 2009, 104(3):276-283.
- [9] 乔璐璐, 王震, 刘世东, 等. 从陆架海到西太平洋: 黄、东海悬浮体跨陆架输运通道与机制[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4):134-140.[QIAO Lulu, WANG Zhen, LIU Shidong, et al. From continental shelf seas to the western Pacific: the path and mechanism of cross-shelf suspended sediment transport in the Yellow Sea and East China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4):134-140.]
- [10] Yang S L, Zhang J, Zhu J, et al. Impact of dams on Yangtze River sediment supply to the sea and delta intertidal wetland response[J]. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2005, 110,F03006.
- [11] Yang S L, Milliman J D, Li P, et al. 50,000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta[J]. *Global & Planetary Change*, 2011, 75(1):14-20.
- [12] Wang H, Dai M, Liu J, et al. Eutrophication-Driven Hypoxia in the East China Sea off the Changjiang Estuary[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(5):2255.
- [13] Li Y, Duan X. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of China Sea[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 22(20):15432.
- [14] 中国地质调查局, DD2012-06: 海岸带环境地质调查规范(1:100000)[S], <http://geocloud.cgs.gov.cn/> [China Geological Survey, DD2012-06: Standard of coastal zone environmental geology survey (1:100000).]
- [15] 张剑, 李日辉, 王中波, 等. 渤海东部与黄海北部表层沉积物的粒度特征及其沉积环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(5):1-12.[ZHANG Jian, LI Rihui, WANG Zhongbo, et al. Grain size characteristics of surface sediments in the east bohai sea and the northern yellow sea and their implications for environments[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(5):1-12.]
- [16] 张媛媛, 贺行良, 孙书文, 等. 元素分析仪-同位素比值质谱仪测定海洋沉积物有机碳稳定同位素方法初探[J]. *岩矿测试*, 2012, 31(4): 627-631.[ZHANG Yuanyuan, HE Xingliang, SUN Shuwen, et al. A Preliminary Study on the Determination of Organic Carbon Stable Isotope of Marine Sediment by Element Analyzer-Isotope Ratio Mass Spectrometer [J]. *Rock & Mineral Analysis*, 2012, 31(4): 627-631.]
- [17] 陈立雷, 张媛媛, 贺行良, 等. 海洋沉积物有机碳和稳定氮同位素分析的前处理影响[J]. *沉积学报*, 2014, 32(6): 1046-1051.[CHEN Lilei, ZHANG Yuanyuan, HE Xingliang, et al. The research on sample-pretreatment of organic carbon and stable nitrogen isotopes in marine sediments[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(6): 1046-1051.]
- [18] 吴金浩, 刘桂英, 王年斌, 等. 辽东湾北部海域表层沉积物氧化还原电位及其主要影响因素[J]. *沉积学报*, 2012, 30(2): 333-339. [WU Jinhao, LIU Guiying, WANG Nianbin, et al. The Eh in surface sediments in the northern of Liaodong Bay and its main influencing factors [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(2):333-339.]
- [19] Yang H F, Yang S L, Xu K H, et al. Human impacts on sediment in the Yangtze River: A review and new perspectives[J]. *Global & Planetary Change*, 2018, 162:8-17.
- [20] 晁海娟, 高建华, 贾建军, 等. 长江口及其邻近海域表层沉积物的有机质物源变化分析[J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(2): 237-242. [CHAO Haijuan, GAO Jianhua, JIA Jianjun, et al. Change of organic matter sources in surface sediments over Changjiang estuary and its adjacent waters[J]. *Marine Environmental Science*, 2017, 36(2):237-242.]
- [21] Zhu C, Xue B, Pan J, et al. The dispersal of sedimentary terrestrial organic matter in the East China Sea (ECS) as revealed by biomarkers and hydro-chemical characteristics[J]. *Organic Geochemistry*, 2008, 39(8):952-957.
- [22] 袁代亮, 何青, 王宪业, 等. 长江口潮滩沉积物抗剪强度分析[J]. *泥沙研究*, 2013, (2):9-15.[YUAN Dailiang, HE Qing, WANG Xianye, et al. Shear strength of sediment on tidal flat in Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2013, (2):9-15.]
- [23] 黄广. 长江口、杭州湾水沙交换与输移特征研究[D]. 华东师范大学, 2007.[HUANG Guang. Study on the characteristics of changjiang estuary and hangzhou bay water sediment exchange and transport [D]. East China Normal University, 2007.]